

PCT/EP04/6504



REC'D 15 JUL 2004
WIPO PCT

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**

Aktenzeichen: 103 28 938.0

Anmeldetag: 27. Juni 2003

Anmelder/Inhaber: Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen/DE

Bezeichnung: Korrektureinrichtung zur Kompensation von Störungen der Polarisationsverteilung sowie Projektionsobjektiv für die Mikrolithografie

IPC: G 02 B 27/28

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 17. Juni 2004
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Dzierzon

**PRIORITY
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1 (a) OR (b)

PATENTANWÄLTE

DR. ULRICH OSTERTAG

DR. REINHARD OSTERTAG

EIBENWEG 10 D-70597 STUTTGART

TEL. +49-711-766845

FAX +49-711-7655701

Korrektureinrichtung zur Kompensation von Störungen
der Polarisationsverteilung sowie
Projektionsobjektiv für die Mikrolithografie

Anmelder: Carl Zeiss SMT AG
73446 Oberkochen

Anwaltsakte: 8479.7

Korrektureinrichtung zur Kompensation von Störungen
der Polarisationsverteilung sowie
Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie
=====

Die Erfindung betrifft eine Korrektureinrichtung zur Kom-
pensation von Störungen der Polarisationsverteilung über
den Querschnitt eines Lichtbündels in einem optischen Sy-
stem, mit mindestens einem Korrekturglied, das ein doppel-
5 brechendes Korrekturelement mit zwei im wesentlichen paral-
lelen Oberflächen umfaßt, zwischen denen die Dicke des Kor-
rekturelements im wesentlichen konstant ist. Die Erfindung
betrifft ferner ein Projektionsobjektiv für die Mikrolitho-
graphie einer derartigen Korrektureinrichtung.

10 Eine Korrektureinrichtung sowie ein Projektionsobjektiv
dieser Art sind aus der DE 198 07 120 A1 bekannt.

Bei zahlreichen optischen Systemen ist Voraussetzung für
eine hohe Abbildungsqualität, daß sich das durch das opti-
sche System hindurchtretende Licht über den gesamten Bün-
15 delquerschnitt hinweg in einem definierten Polarisationszu-
stand befindet. Da dieser definierte Polarisationszustand
nicht konstant über den Bündelquerschnitt sein muß, spricht
man häufig auch von einer definierten Polarisationsvertei-
lung des Lichts. Kommt es zu Abweichungen von dieser defi-
20 nierten Polarisationsverteilung, so kann dies zu nicht to-
lerierbaren Abbildungsfehlern und/oder zu Kontrastverlusten
in der Bildebene führen. Als Ursachen für derartige Abwei-

chungen kommen beispielsweise die Polarisationsabhängigkeit reflektierender Schichten oder die Doppelbrechung bestimmter Linsematerialien in Betracht.

Der letztgenannte Punkt hat besondere Bedeutung im Zusammenhang mit mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlagen erlangt, wie sie etwa zur Herstellung hochintegrierter elektrischer Schaltkreise verwendet werden. Dort kommen in zunehmendem Maße Linsen aus Flußspat (CaF_2) zum Einsatz, da diese Kristalle auch bei sehr kurzen Projektionslichtlängen noch eine ausreichende optische Transparenz aufweisen. Flußspat ist bei sehr kurzen Wellenlängen jedoch von Hause aus (d.h. intrinsisch) doppelbrechend; hinzutreten kann außerdem eine durch mechanische Spannungen hervorgerufene Doppelbrechung. Zwar sind inzwischen verschiedene Maßnahmen bekannt, um die Doppelbrechung von Flußspat-Linsen zu verringern, eine vollständige Kompensation von Störungen der Polarisationsverteilung über den Querschnitt des Projektionslichtbündels ist aber im allgemeinen nicht möglich. Bleiben diese Störungen unkompensiert, so verringert sich der Kontrast der Projektionsobjektive, was sich ungünstig auf die Größe der mit derartigen Anlagen gerade noch herstellbaren Strukturen führt.

Da die hier betrachteten Störungen der Polarisationsverteilung die Eigenschaft haben, über den Querschnitt eines Lichtbündels zu variieren, scheidet eine Kompensation mit herkömmlichen Polarisations-Kompensatoren, z.B. eines Soleil-Babinet-Kompensators, aus, da diese Kompensatoren

gleichmäßig über den Querschnitt des Lichtbündels hinweg wirken.

Aus der eingangs bereits genannten DE 198 07 120 A1 ist eine Korrektureinrichtung zur Kompensation von Störungen der Polarisierung bekannt, die über den Querschnitt eines Lichtbündels hinweg lokal variieren. Die dort beschriebene Korrektureinrichtung weist eine in den Strahlengang des optischen Systems eingebrachte Platte auf, die aus Magnesiumfluorid (MgF_2) besteht und somit doppelbrechend ist. Die Dicke der Platte variiert dabei über deren Querschnitt, wodurch sich eine ortsabhängige Kompensationswirkung ergibt. Da die zur Kompensation erforderlichen Dickenschwankungen nur wenige Mikrometer betragen, lassen sich die Freiformflächen auf der Platte nicht durch Polieren oder andere klassische Verfahren des Materialabtrags herstellen. Vorgeschlagen wird deswegen eine Herstellung der Freiformflächen im Wege der Ionenstrahl-Bearbeitung. Derartige Bearbeitungsverfahren werden beispielsweise bei der Herstellung von sog. "Nanoasphären" eingesetzt, die zur Korrektur von Wellenfrontfehlern in Projektionsbelichtungsanlagen verwendet werden.

Um eine möglichst allgemeine Klasse von Polarisationsstörungen kompensieren zu können, wird die Verwendung zweier derartiger Platten vorgeschlagen, deren Hauptachsen um 45° zueinander verdreht sind. Da sich die Dickenschwankungen nicht nur auf die Polarisierung, sondern in noch stärkerem Maße auf den Wellenfrontverlauf hindurchtretenden Lichts

auswirken, ist jeder der Korrekturplatten eine Quarzplatte zur Wellenfrontkompensation zugeordnet, die ihrerseits Dikenschwankungen aufweisen, die jedoch komplementär zu denen der Korrekturplatten verlaufen. Eine Korrekturplatte und
5 die dazugehörige Quarzplatte, die spaltfrei durch Anspren-
gen oder Verketteten miteinander verbunden werden, wirken
sich in ihrer Gesamtheit aufgrund der annähernd gleichen
Brechungsindizes kaum auf den Wellenfrontverlauf hindurch-
tretenden Lichts aus.

- 10 Nachteilig bei dieser bekannten Korrektureinrichtung ist
allerdings, daß die Korrekturplatten die Polarisierung nicht
nur dort beeinflussen, wo Störungen kompensiert werden sol-
len, sondern die Polarisierung über den gesamten Querschnitt
des Lichtbündels verändern. Dies hängt damit zusammen, daß
15 die Korrekturplatten nicht ausschließlich dort doppelbre-
chendes Material aufweisen können, wo eine Kompensation von
Störungen der Polarisationsverteilung erforderlich ist. Die
Korrekturplatten dürften dann nämlich nur wenige Mikrometer
dick sein und wiesen zudem Löcher an den Stellen auf, an
20 denen keine Störungen zu kompensieren sind. Derartige Kor-
rekturplatten wären weder herstell- noch handhabbar. Daher
müssen die Korrekturplatten zusätzliches, als eine Art Trä-
ger wirkendes Material aufweisen, das jedoch über seinen
gesamten Querschnitt hinweg zur Polarisationsbeeinflussung
25 beiträgt.

Aufgabe der Erfindung ist es, eine Korrektureinrichtung der
eingangs genannten Art derart zu verbessern, daß die Pola-

risation hindurchtretenden Lichts gezielt nur dort beeinflusst wird, wo Störungen der Polarisationsverteilung zu kompensieren sind.

5 Gelöst wird diese Aufgabe dadurch, daß wenigstens ein Korrekturglied wenigstens ein dem einen Korrekturalelement zugeordnetes weiteres doppelbrechendes Korrekturalelement mit zwei im wesentlichen parallelen Oberflächen aufweist, daß wenigstens eine der Oberflächen wenigstens eines der Korrekturalelemente so nachbearbeitet ist, daß sich lokale Dickenchwankungen Δd ergeben, durch die die Störungen der Polarisationsverteilung zumindest annähernd kompensiert werden, und daß die Anordnung, Dicke und Doppelbrechungseigenschaften der Korrekturalelemente so gewählt sind, daß sich deren doppelbrechenden Wirkungen gegenseitig aufheben, wenn
10
15 die lokalen Dickenchwankungen außer Betracht bleiben.

Die Erfindung beruht auf der Erkenntnis, daß mehrere doppelbrechende Elemente, deren Doppelbrechungsachsen in geeigneter Weise zueinander orientiert sind, sich in ihrer doppelbrechenden Wirkung aufheben. Die Erfindung geht also
20 zunächst von einer Anordnung zweier oder mehrerer doppelbrechender Korrekturalelemente aus, die insgesamt die Polarisations hindurchtretenden Lichts nicht beeinflussen. Wird nun an einem oder mehreren dieser Korrekturalelemente die Dicke lokal verändert, so beschränkt sich die doppelbrechende Wirkung der gesamten Anordnung lediglich auf diejenigen Bereiche, in denen Dickenänderungen vorgenommen wurden. Falls die Korrekturalelemente aus demselben doppelbre-

25

chenden Material bestehen, so müssen sie, abgesehen von den durch nachträgliche Bearbeitung eingebrachten Dickenschwankungen, die gleiche Dicke aufweisen, damit eine vollständige gegenseitige Kompensation der doppelbrechenden Wirkung eintritt.

Bei einem Korrekturglied, das aus zwei Korrekturalelementen besteht, können diese beispielsweise mit um 90° zueinander verdrehten Doppelbrechungsachsen in der Korrekturereinrichtung angeordnet sein. Bei drei Korrekturalelementen kommt eine relative Orientierung der Doppelbrechungsachsen in 120° -Winkeln in Betracht.

Bei einer bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung sind die Oberflächen der Korrekturalelemente so komplementär zueinander nachbearbeitet, daß die Gesamtdicke aller Korrekturalelemente eines Korrekturglieds über deren Querschnitt hinweg konstant ist. Da das Korrekturglied als Ganzes keine Dickenschwankungen aufweist, werden Wellenfrontfehler weitgehend vermieden. Dies gilt auch dann, wenn die einzelnen Korrekturalelemente nicht unmittelbar aufeinander befestigt, sondern beabstandet voneinander in der Korrekturereinrichtung angeordnet sind. Falls es sich bei den Korrekturalelementen beispielsweise um ebene Scheiben handelt, so wirkt das gesamte Korrekturglied wie eine planparallele Platte, die zwar lokal die Polarisierung, nicht aber nennenswert den Verlauf der Wellenfront beeinflußt. Auf zusätzliche Quarzplatten, die im Stand der Technik zum Ausgleichen der opti-

schen Weglängenunterschiede auf Grund der Dickenschwankungen erforderlich sind, kann somit verzichtet werden.

Vorteilhaft bei dieser Ausgestaltung ist ferner, daß sich die zur Störungskompensation an einem bestimmten Punkt erforderliche lokale Dickenschwankung auf diese Weise zwangsläufig auf mehrere Korrekturalelemente verteilt. Falls beispielsweise das Korrekturglied zwei Korrekturalelemente umfaßt, so führt die komplementäre Nachbearbeitung der Oberflächen dazu, daß eine lokale Dickenschwankung Δd so auf die beiden Korrekturalelemente verteilt wird, daß an dem entsprechenden Punkt die Dicke bei einem Korrekturalelement um $\Delta d/2$ verringert und bei dem anderen Korrekturalelement um $\Delta d/2$ vergrößert ist. Die Verteilung der Dickenschwankungen auf mehrere Korrekturalelemente ist insbesondere bei größeren Dickenschwankungen vorteilhaft, da sich diese mit den bekannten Methoden der Nachbearbeitung wie Ionen- oder Atomstrahlätzen nur mit größeren Schwierigkeiten präzise erzeugen lassen.

Idealerweise soll die Korrekturanrichtung lediglich lokal die Polarisierung beeinflussen, ansonsten aber nicht die Lichtausbreitung in dem optischen System verändern, in dem die Korrekturanrichtung eingebaut ist. Bei Strahlbündeln mit kleinem Aperturwinkel wird es vor diesem Hintergrund im allgemeinen ausreichen, die Korrekturalelemente als planparallele Platten auszuführen, deren Umfang an die Geometrie des durchtretenden Lichtbündels angepaßt sein kann. Bei Lichtbündeln mit größeren Aperturwinkeln hingegen kommen

auch Korrekturalemente mit gekrümmten, z.B. sphärischen, Oberflächen in Betracht.

Ein Anwendungsfall hierfür sind katadioptrische Projektionsobjektive, die in der Regel einen in einer Pupillenebene angeordneten sphärischen Abbildungsspiegel enthalten. Um die Korrekturanrichtung möglichst nahe einer Pupillenfläche und damit in unmittelbarer Nähe der gekrümmten Spiegeloberfläche anzuordnen, ist eine Anpassung der Oberfläche der Korrekturalemente an die Spiegelkrümmung praktisch unvermeidbar. Eine Anordnung der Korrekturanrichtung in einer Pupillenebene ist deswegen generell bevorzugt, weil diese dann eine feldunabhängige Wirkung hat, so daß als Korrekturgröße ein mittlerer Polarisationsfehler im Feld angenommen werden kann.

Selbst bei über den Querschnitt hinweg konstanter Gesamtdicke aller Korrekturalemente sind allerdings geringfügige Wellenfrontfehler auf Grund der Dickenschwankungen der einzelnen Korrekturalemente nicht gänzlich vermeidbar. Aus diesem Grunde kann es zweckmäßig sein, daß wenigstens ein Korrekturalement eine Oberfläche aufweist, die zusätzlich derart nachbearbeitet ist, daß Wellenfrontfehler auf Grund der Dickenschwankungen verringert werden.

Mit lediglich einem Korrekturglied lassen sich nicht sämtliche Arten von Polarisationsstörungen kompensieren. Deswegen sind bei einer bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung zwei Korrekturglieder vorgesehen, wobei die Doppelbre-

chungsachsen der Korrektur Elemente des einen Korrekturglieds um 45° zu den Doppelbrechungsachsen der Korrektur Elemente des anderen Korrekturglieds verdreht sind. Auf diese Weise lassen sich nicht nur Phasenverschiebungen,
5 sondern auch Drehungen der Polarisation kompensieren.

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden im folgenden anhand der Zeichnungen erläutert. Darin zeigen:

- Figur 1 eine stark vereinfachte Darstellung der Polarisationsverteilung über den Querschnitt eines Lichtbündels;
10
- Figur 2 eine perspektivische, nicht maßstäbliche Darstellung einer erfindungsgemäßen Korrekturanordnung mit zwei Korrektur Elementen, die von einem Lichtbündel durchtreten werden;
- 15 Figur 3 einen Querschnitt durch die in Figur 2 gezeigten Korrektur Elemente vor dem Zusammenfügen;
- Figur 4 eine der Figur 3 entsprechende Darstellung, jedoch nach dem Zusammenfügen der Korrektur Elementen;
- 20 Figur 5 einen Querschnitt durch ein anderes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Korrekturanordnung mit drei Korrektur Elementen;

Figur 6 einen Querschnitt durch ein weiteres Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Korrekturereinrichtung, die zwei Korrekturglieder mit jeweils zwei Korrekturerelementen umfaßt;

- 5 Figur 7 einen vereinfachten Meridionalschnitt durch ein katadioptrisches Projektionsobjektiv mit einer erfindungsgemäßen Korrekturereinrichtung.

Figur 1 zeigt einen Querschnitt durch ein Lichtbündel 10, in dem schematisch eine Polarisationsverteilung mit Hilfe von Pfeilen 12 angedeutet ist. Die Pfeile 12 sollen dabei die Polarisationsrichtung innerhalb des Lichtbündels 10 darstellen. Wie in Figur 1 erkennbar, ist das Licht über den Querschnitt des Lichtbündels 10 hinweg überwiegend linear mit der gleichen Polarisationsrichtung polarisiert. An einigen Punkten, die in Figur 1 mit 14a, 14b und 14c bezeichnet sind, ist das Licht jedoch nicht exakt linear, sondern mehr oder weniger stark elliptisch polarisiert. Diese Störungen der Polarisationsverteilung können in nachfolgenden polarisationsselektiven optischen Elementen, z.B. Strahlteilerschichten oder Verzögerungsplättchen, zu nicht tolerierbaren Abbildungsfehlern und/oder zur einem Kontrastverlust in der Bildebene führen.

Figur 2 zeigt in einer perspektivischen, nicht maßstäblichen Darstellung eine Korrekturereinrichtung 16, mit der die Störungen 14a, 14b und 14c in der Polarisationsverteilung des Lichtbündels 10 kompensiert werden können. Die Korrektur-

tureinrichtung 16 weist neben in Figur 2 nicht dargestellten Halterungselementen ein Korrekturglied 18 auf, das seinerseits ein erstes und ein zweites scheibenförmiges Korrekturlement 20 bzw. 22 umfaßt, die fugenlos zusammengefügt sind. Die beiden Korrekturlemente 20, 22 sind aus Magnesiumfluorid-Kristallen (MgF_2) gefertigt und daher doppelbrechend. Magnesiumfluorid ist insbesondere für Anwendungen in der Mikrolithographie geeignet, da es auch bei den dort verwendeten Wellenlängen von 193 nm oder 157 nm noch transparent ist.

Die Orientierung der Kristallachsen ist dabei so gewählt, daß sich für die beiden Korrekturlemente 20, 22 die in Figur 2 durch Achsenkreuze dargestellten Doppelbrechungsachsen ergeben. Die langsame Kristallachse mit dem größeren Brechungsindex n_1 und die schnelle Kristallachse mit dem kleineren Brechungsindex n_2 stehen jeweils senkrecht aufeinander und außerdem senkrecht zu der mit Z bezeichneten optischen Achse der Korrektureinrichtung 16.

Dies bedeutet, daß in dem ersten Korrekturlement 20 eine Polarisationskomponente des Lichtbündels 10, die entlang der langsamen Kristallachse verläuft, gegenüber der dazu senkrechten Polarisationskomponente eine auch als Verzögerung bezeichnete Phasenänderung Φ erfährt, die durch

$$\Phi = (2\pi/\lambda) \cdot d \cdot (n_1 - n_2)$$

gegeben ist. Darin bezeichnet λ die Wellenlänge des auf das Korrekturglied 18 auftreffenden Lichts und d die Dicke des Korrekturlements 20 entlang der optischen Achse Z.

In dem zweiten Korrekturlement 22 hingegen wird die hierzu
5 senkrechte Polarisationskomponente verzögert, da die Kristallorientierungen der Korrekturlemente 20, 22 und damit deren Doppelbrechungsachsen um 90° um die Z-Achse zueinander verdreht sind. Da die beiden Korrekturlemente 20, 22 die gleiche Dicke haben, ist der Betrag der Phasenänderungen
10 gleich. Auf diese Weise wird die durch das erste Korrekturlement 20 hervorgerufene Phasenänderung der einen Polarisationskomponente durch eine gleich große, durch das zweite Korrekturlement 22 hervorgerufene Phasenänderung der dazu senkrechten Polarisationskomponente kompensiert.
15 Dort, wo die Dicken der beiden Korrekturlemente 20, 22 exakt gleich sind, wird somit die relative Phasenlage zwischen zueinander senkrechten Polarisationskomponenten und somit der Polarisationszustand des hindurchtretenden Lichts nicht verändert.

20 Um nun die in Figur 1 schematisch gezeigten Störungen der Polarisationsverteilung zu kompensieren, sind über den Querschnitt hinweg an geeignet gewählten Punkten die Dicken der beiden Korrekturlemente 20, 22 bewußt abweichend gewählt.

25 Figur 3 zeigt einen Querschnitt durch die beiden Korrekturlemente 20, 22 vor dem Zusammenfügen. In stark übertriebener

ner Darstellung sind dabei auf den einander zugewandten Oberflächen 24 und 26 der beiden Korrekturlemente 20, 22 zu Dickenschwankungen führende Strukturen zu erkennen, die komplementär zueinander ausgebildet sind. Dies bedeutet, daß zu jeder Erhöhung auf einer Oberfläche eine Ausnehmung auf der gegenüberliegenden Oberfläche korrespondiert, und daß die korrespondierenden Erhöhungen und Ausnehmungen so ausgebildet sind, daß sie beim Zusammenfügen der beiden Korrekturlemente 20, 22 paßgenau ineinander eingreifen.

10 Durch das mit einem Pfeil 28 angedeutete Zusammenführen der beiden Korrekturlemente 20, 22 entsteht dann das in Figur 4 gezeigte Korrekturglied 18, das aus einem Materialblock mit gleichmäßiger Gesamtdicke d_g besteht, der keinerlei Hohlräume enthält.

15 Wie in Figur 3 erkennbar ist, haben beide Korrekturlemente 20, 22 bei Außerbetrachtlassen der Dickenschwankungen die gleiche Dicke d , um die oben im Zusammenhang mit der Figur 2 erläuterte Grundkompensation der Phasenänderungen zu erzielen. An der Oberfläche 26 des zweiten Korrekturlements

20 22 sind durch Ionenstrahlätzen oder ähnliche geeignete Bearbeitungsverfahren nachträglich mehrere Ausnehmungen 30, 32 und 34 eingearbeitet, um an dieser Stelle eine Störung der Polarisationsverteilung zu kompensieren. Die gegenüberliegende Oberfläche 24 des ersten Korrekturlements 20

25 weist entsprechende Erhöhungen 30', 32' und 34' auf, deren Form exakt derjenigen der gegenüberliegenden Ausnehmungen entspricht. Die Erhöhungen 30', 32' und 34' werden erzeugt, indem zunächst das erste Korrekturlement 20 mit einem ge-

strichelt angedeuteten Dickenvorhalt 36 hergestellt wird, so daß durch nachträgliches Abtragen von Material um die Erhöhungen 30', 32' und 34' herum diese freigelegt werden können.

5 Es versteht sich, daß die hier vorgenommene Einteilung in Ausnehmungen 30, 32, 34 einerseits und Erhöhungen 30', 32', 34' andererseits lediglich dazu dient, die Darstellung zu vereinfachen. Ob man die Oberfläche 26 des zweiten Korrektur-
10 elements 22 durch die Ausnehmungen 30, 32, 34 oder aber durch Erhöhungen definiert, die zwischen den Ausnehmungen 30, 32, 34 liegen, ist lediglich eine Frage der Definition. Ganz allgemein können die Oberflächen 24, 26 der Korrektur-
elemente 20 bzw. 22 eine praktisch beliebige, jedoch zueinander komplementäre Welligkeit aufweisen.

15 Um Lage und Ausmaß der Dickenschwankungen festzulegen, kann beispielsweise wie folgt vorgegangen werden:

Zunächst wird in einer Bildebene des optischen Systems, in dem die Korrekturereinrichtung 16 eingebaut ist, die Polarisationsverteilung meßtechnisch aufgenommen. Hierzu werden
20 in einer Objektebene des optischen Systems nacheinander zwei orthogonale Polarisationen eingestellt und jeweils in der Bildebene der Polarisationszustand erfaßt. Aus der Differenz der Meßergebnisse errechnet sich der Korrekturbedarf in Abhängigkeit von der optischen Lage des Korrekturglieds
25 18. Befindet sich das Korrekturglied 18 in einer Pupillenebene des optischen Systems, so ist die Wirkung des Korrektur-

turgliedes 18 feldunabhängig. Dadurch ist es möglich, den mittleren Polarisationsfehler im Feld als Korrekturgröße zu verwenden. Wenn mit $\Phi(\theta, \varphi)$ die Phasendifferenz zwischen den beiden senkrechten Polarisationszuständen in Abhängigkeit von den Winkelkoordinaten θ und φ von Strahlen in der Bildebene bezeichnet wird, so ergibt sich die erforderliche Dickenschwankung Δd eines Korrekturlements an den Ortskoordinaten (x, y) aus

$$\Delta d(x, y) = \Phi(\theta, \varphi) \cdot (\lambda/2\pi) \cdot 1/(n_1 - n_2) \quad .$$

Da eine Dickenschwankung $\Delta d(x, y)$ an einem Ort (x, y) bei dem in den Figuren 2 bis 4 gezeigten Ausführungsbeispiel jeweils gleichmäßig auf die beiden Korrekturlemente 20, 22 verteilt wird, um die Gesamtdicke d_g konstant zu halten, führt dies bei den beiden Korrekturlementen 20, 22 an dem Ort (x, y) zu einer Erhöhung bzw. Ausnehmung um einen Betrag von $d_z = \Delta d/2$. Diese Größe d_z , die herstellungstechnisch die Höhe des erforderlichen Materialabtrags angibt, wird im folgenden als Profiltiefe bezeichnet. Die Tatsache, daß die Profiltiefe gegenüber der erforderlichen Dickenschwankung Δd um den Faktor 2 verringert ist, hat erhebliche herstellungstechnische Vorteile, da es mit den bisher bekannten Verfahren zum hochgenauen Materialabtrag bisweilen Schwierigkeiten bereitet, große Profiltiefen zu erzielen.

In Figur 3 ist die Profiltiefe d_z beispielhaft für den Ort mit der größten bzw. der geringsten Dicke der Korrekturlemente 20, 22 eingezeichnet. Aus dieser Darstellung ergibt

sich auch, daß der Dickenvorhalt 36 auf dem ersten Korrektur-
element 20 so gewählt werden sollte, daß er (mindestens)
gleich der maximalen Profiltiefe und somit der Hälfte der
maximalen Dickenschwankung Δd ist, die zur Störungs-
5 kompensation erforderlich ist.

Die sich auf diese Weise ergebenden Profiltiefen d_z liegen
bei einer Anwendung des Korrekturlements 16 in der Mikro-
lithographie mit Wellenlängen von 193 nm oder 157 nm in der
Größenordnung von einigen hundert Nanometern, während die
10 Dicken d der Scheiben in der Größenordnung einiger Millime-
ter liegen. Die in Figur 3 dargestellten Profiltiefen d_z
sind somit stark übertrieben dargestellt.

Figur 5 zeigt ein anderes Ausführungsbeispiel einer Korrektur-
einrichtung, die insgesamt mit 118 bezeichnet ist. Teile,
15 die denen des in den Figuren 2 bis 4 gezeigten Ausführungs-
beispiels entsprechen, sind dabei mit um 100 erhöhten
Bezugsziffern versehen. Bei diesem Ausführungsbeispiel ist
das erste Korrekturlement in zwei Teilelemente 120a, 120b
aufgeteilt, die zwischen sich das zweite Korrekturlement
20 122 einschließen und deren Gesamtdicke derjenigen des zwei-
ten Korrekturlements 122 entspricht. Die Dickenschwankun-
gen Δd sind hier auf zwei Grenzflächen aufgeteilt, die
durch die im wesentlichen parallelen Oberflächen 126, 127
des zweiten Korrekturlements 122 festgelegt sind. Dadurch
25 halbiert sich für jede dieser Oberflächen 126, 127 die Pro-
filitiefe nochmals um einen Faktor 2 auf $d_z/2 = \Delta d/4$.

Figur 6 zeigt in einem Querschnitt ein weiteres Ausführungsbeispiel für eine Korrektureinrichtung, die insgesamt mit 216 bezeichnet ist. Die Korrektureinrichtung 216 umfaßt zum einen das Korrekturglied 18, wie es in den Figuren 2 bis 4 gezeigt ist. Ferner enthält die Korrektureinrichtung 216 zwei weitere Korrekturalemente 220 und 222, die gemeinsam ein weiteres Korrekturglied bilden. Wie links neben dem Querschnitt dargestellt ist, gehen die Orientierungen der Kristallachsen der beiden Korrekturalemente 220 und 222 durch eine Drehung um 45° aus den Kristallachsen der Korrekturalemente 20 bzw. 22 hervor. Dadurch stehen auch bei den beiden äußeren Korrekturalementen 220, 222 die schnellen Kristallachsen und auch die langsamen Kristallachsen jeweils senkrecht aufeinander. Auf diese Weise kompensieren sich, wenn Dickenschwankungen zunächst unberücksichtigt bleiben, die beiden äußeren Korrekturalemente 220, 222 vollständig in ihrer Wirkung auf die Polarisierung hindurchtretenden Lichts.

Wie in Figur 6 übertrieben dargestellt ist, weisen auch die äußeren Korrekturalemente 40 und 42 Dickenschwankungen auf, die in der oben bereits beschriebenen Weise zueinander komplementär sind. Auf Grund ihrer Anordnung an gegenüberliegenden Seiten des Korrekturgliedes 18 können die dadurch entstehenden Ausnehmungen und Erhöhungen jedoch nicht miteinander in Eingriff gebracht werden. Die Gesamtdicke d_g der Korrektureinrichtung 216 ist jedoch an jeder Koordinate (x,y) die identisch.

Da die Doppelbrechungsachsen des durch die beiden äußeren Korrekturalemente 220, 222 gebildeten Korrekturglieds um 45° gegenüber den Doppelbrechungsachsen des Korrekturglieds 18 verdreht sind, lassen sich durch die Korrekturereinrichtung 216 nicht nur Phasenverschiebungen, sondern auch Drehungen der Polarisationsrichtung kompensieren. Um in diesem allgemeinen Fall die Anordnung und Größe der Dickenschwankungen auf den einzelnen Korrekturalementen 20, 22, 220 und 222 zu bestimmen, wird vorzugsweise für jeden Feldpunkt und für jede Winkelkoordinate die Jonesmatrix als Linearkombination von Elementarmatrizen dargestellt, die Phasenverschiebungen und Drehungen der Polarisation beschreiben. Durch Gleichsetzen der so dargestellten Jonesmatrix für jeden Feldpunkt mit einer Jonesmatrix für die in Figur 6 gezeigte Anordnung, die lediglich phasenverschiebende Elemente enthält, kann durch Koeffizientenvergleich auf die Größe der Dickenschwankungen an den Punkten (x,y) auf den Oberflächen der Korrekturalemente geschlossen werden.

Mit 40 ist in Figur 6 beispielhaft und ebenfalls nicht maßstäblich ein zusätzlicher Materialabtrag angedeutet, der lediglich an einer nach außen weisenden Oberfläche 42 des Korrekturalements 220 vorhanden ist und keine Entsprechung in Form einer korrespondierenden Erhöhung an dem zugeordneten Korrekturalement 222 hat. Dieser Materialabtrag dient dazu, bei der Polarisationskompensation auftretende kleine Wellenfrontfehler zu beseitigen. Dabei wird ausgenutzt, daß sich ein Materialabtrag bei MgF_2 etwa hundertmal stärker auf die Wellenfront auswirkt als auf die Polarisation.

Figur 7 zeigt in einem vereinfachten Meridionalschnitt ein katadioptrisches, insgesamt mit 56 bezeichnetes Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage. Das Projektionsobjektiv 56 dient dazu, in einem Retikel 58 enthaltene Strukturen verkleinert auf einer lichtempfindlichen Oberfläche abzubilden, die auf einem Substrat 60 aufgebracht ist. Durch das Retikel 58 hindurchtretendes Projektionslicht tritt in einen Strahlteilerwürfel 62 ein, wird dort an einer polarisationsselektiven Strahlteilerschicht 64 reflektiert und über ein Viertelwellenlängenplättchen 66 und mehrere Linsen auf einen sphärischen Abbildungsspiegel 68 geworfen. Nach Reflexion an dem Abbildungsspiegel 68 wird die Polarisierung erneut in dem Viertelwellenlängenplättchen 66 gedreht, so daß das Projektionslicht nunmehr die Strahlteilerschicht 64 durchdringen und in einen rein dioptrischen Teil 70 des Projektionsobjektivs 60 gelangen kann.

Der sphärische Abbildungsspiegel 68 ist in der Nähe einer Pupillenebene 72 des Projektionsobjektivs 60 angeordnet. Unmittelbar vor dem Abbildungsspiegel 68, d.h. ebenfalls in der Nähe der Pupillenebene 72, ist eine Korrektoreinrichtung 316 angeordnet, die zwei sphärisch gekrümmte Korrektorelemente 320, 322 umfaßt. Durch die Krümmung ist sichergestellt, daß die Korrektoreinrichtung nicht zu weit von der Pupillenebene 72 entfernt angeordnet ist. Außerdem wirkt sich die Korrektoreinrichtung 316 auf diese Weise weniger auf den Wellenfrontverlauf von unter großem Aperturwinkel auftreffenden Strahlen aus. Da aufgrund der Reflexi-

on an dem Abbildungsspiegel 68 jeder Projektionslichtstrahl
die Korrekturereinrichtung 316 zweimal durchtritt, können die
Dickenschwankungen Δd um einen Faktor 2 im Vergleich zu ei-
ner Anordnung reduziert werden, bei der nur ein einmaliger
5 Durchtritt durch das Korrekturerelement stattfindet.

Patentansprüche

=====

1. Korrektureinrichtung zur Kompensation von Störungen
 der Polarisationsverteilung über den Querschnitt eines
Lichtbündels (10) in einem optischen System (56), mit min-
destens einem Korrekturglied (18; 118), das ein doppelbre-
5 chendes Korrekturalelement (22; 122; 222; 322) mit zwei im
wesentlichen parallelen Oberflächen (26; 126, 127) umfaßt,
zwischen denen die Dicke (d) des Korrekturalelements (22,
122, 222) im wesentlichen konstant ist,
- dadurch gekennzeichnet,
- 10 daß das wenigstens eine Korrekturglied (18, 118) wenigstens
ein dem einen Korrekturalelement (22; 122; 222; 322) zugeord-
netes weiteres doppelbrechendes Korrekturalelement (20; 120a,
120b; 220; 320) mit zwei im wesentlichen parallelen Ober-
flächen (24) aufweist, daß wenigstens eine der Oberflächen
15 (24, 26; 126, 127) wenigstens eines der Korrekturalemente
(20, 22; 120a, 120b, 122; 220; 222; 320, 322) so nachbear-
beitet ist, daß sich lokale Dickenschwankungen Δd ergeben,
durch die die Störungen der Polarisationsverteilung zumin-
dest annähernd kompensiert werden, und daß die Anordnung,
20 Dicke (d) und Doppelbrechungseigenschaften der Korrektur-
elemente (20, 22; 120a, 120b, 122; 220; 222; 320, 322) so
gewählt sind, daß sich deren doppelbrechenden Wirkungen ge-
genseitig aufheben, wenn die lokalen Dickenschwankungen Δd
außer Betracht bleiben.

2. Korrektureinrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrekturelemente (20, 22; 120a, 120b, 122; 220; 222; 320, 322) aus demselben Material bestehen.
- 5 3. Korrektureinrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberflächen (24, 26; 126, 127) der Korrekturelemente (20, 22; 120a, 120b, 122; 220; 222; 320, 322) so komplementär zueinander nachbearbeitet sind, daß die Gesamtdicke (d_g) aller Korrekturelemente (20, 22; 120a,
10 120b, 122; 220; 222; 320, 322) eines Korrekturglieds (18; 118) über deren Querschnitt hinweg konstant ist.
4. Korrektureinrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß das Korrekturglied (18; 118) zwei Korrekturelemente umfaßt und daß die zur Störungskompensation
15 an einem bestimmten Punkt erforderliche lokale Dicken-
schwankung Δd so verteilt ist, daß an diesem Punkt die Dicke (d) bei einem Korrekturelement (22) um $\Delta d/2$ verringert und bei dem anderen Korrekturelement (20) um $\Delta d/2$ vergrößert ist.
- 20 5. Korrektureinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberflächen der Korrekturelemente (320, 322) gekrümmt sind.
6. Korrektureinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Korrekturglied (18, 118) zwei Korrekturelemente (20, 22; 120a, 120b,
25

122; 220; 222; 320, 322) umfaßt, deren Doppelbrechungsachsen zueinander um 90° verdreht sind.

7. Korrektureinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens ein
- 5 Korrekturelement (220) eine Oberfläche aufweist, die zusätzlich derart nachbearbeitet (40) ist, daß Wellenfrontfehler aufgrund der Dickenschwankungen verringert werden.
8. Korrektureinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zwei Korrektur-
- 10 glieder (18, 220 und 222) vorgesehen sind, wobei die Doppelbrechungsachsen der Korrekturelemente (20, 22) des einen Korrekturglieds (18) um 45° zu den Doppelbrechungsachsen der Korrekturelemente (220, 222) des anderen Korrekturglieds verdreht sind.
- 15 9. Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie mit einer Korrektureinrichtung (316) nach einem der vorhergehenden Ansprüche.
10. Projektionsobjektiv nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrektureinrichtung (316) zumindest
- 20 annähernd in einer Pupillenebene (72) des Projektionsobjektivs (56) angeordnet ist.
11. Projektionsobjektiv nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrektureinrichtung (316) in unmittelbarer Nähe eines Abbildungsspiegels (68) angeordnet ist,

der in einem katadioptischen Teil des Projektionsobjektivs (56) enthalten ist.

12. Projektionsobjektiv nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, daß eine weitere Korrekturereinrichtung
5 nach einem der Ansprüche 1 bis 8 zumindest annähernd in einer Feldebene des Projektionsobjektivs (56) angeordnet ist.

Zusammenfassung

=====

Eine Korrektureinrichtung zur Kompensation von Störungen der Polarisationsverteilung über den Querschnitt eines Lichtbündels (10) weist ein Korrekturglied (18; 118) auf, das zwei doppelbrechende Korrekturalemente (20, 22; 120a, 120b, 122; 220; 222; 320, 322) mit zwei im wesentlichen parallelen Oberflächen (24, 26; 126, 127) umfaßt. Zwischen den Oberflächen (26; 126, 127) ist die Dicke (d) des Korrekturalelements (22, 122, 222) im wesentlichen konstant. Wenigstens eine der Oberflächen (24, 26; 126, 127) wenigstens eines der Korrekturalemente (20, 22; 120a, 120b, 122; 220; 222; 320, 322) ist so nachbearbeitet, daß sich lokale Dickenschwankungen Δd ergeben, durch die die Störungen der Polarisationsverteilung zumindest annähernd kompensiert werden. Die Anordnung, Dicke (d) und Doppelbrechungseigenschaften der Korrekturalemente (20, 22; 120a, 120b, 122; 220; 222; 320, 322) sind so gewählt, daß sich deren doppelbrechenden Wirkungen gegenseitig aufheben, wenn die lokalen Dickenschwankungen Δd außer Betracht bleiben. Die Korrekturanrichtung beeinflusst die Polarisation nur dort, wo Störungen kompensiert werden sollen.

(Figur 3)

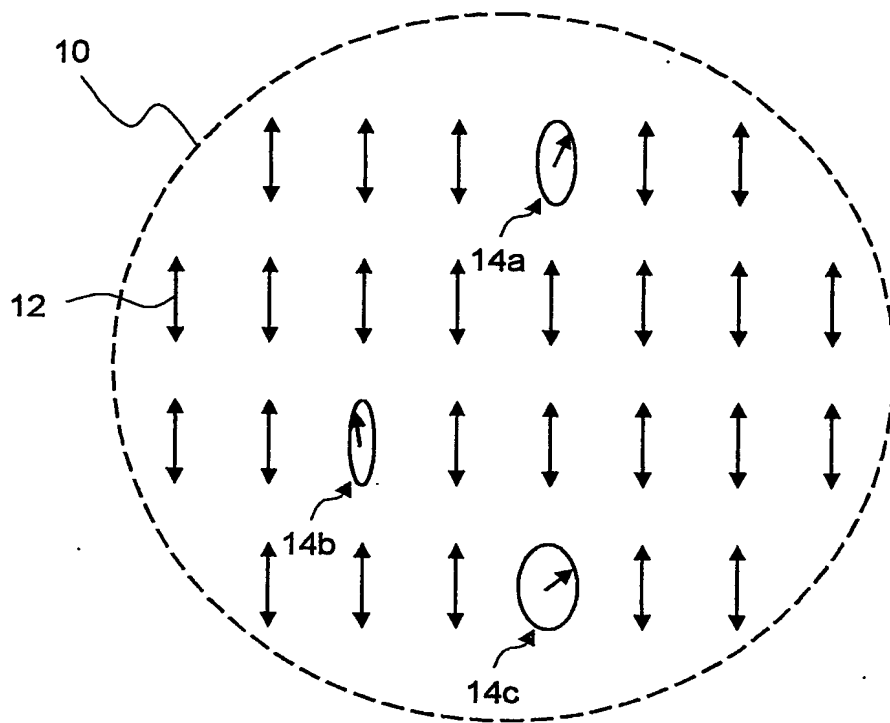


Fig. 1

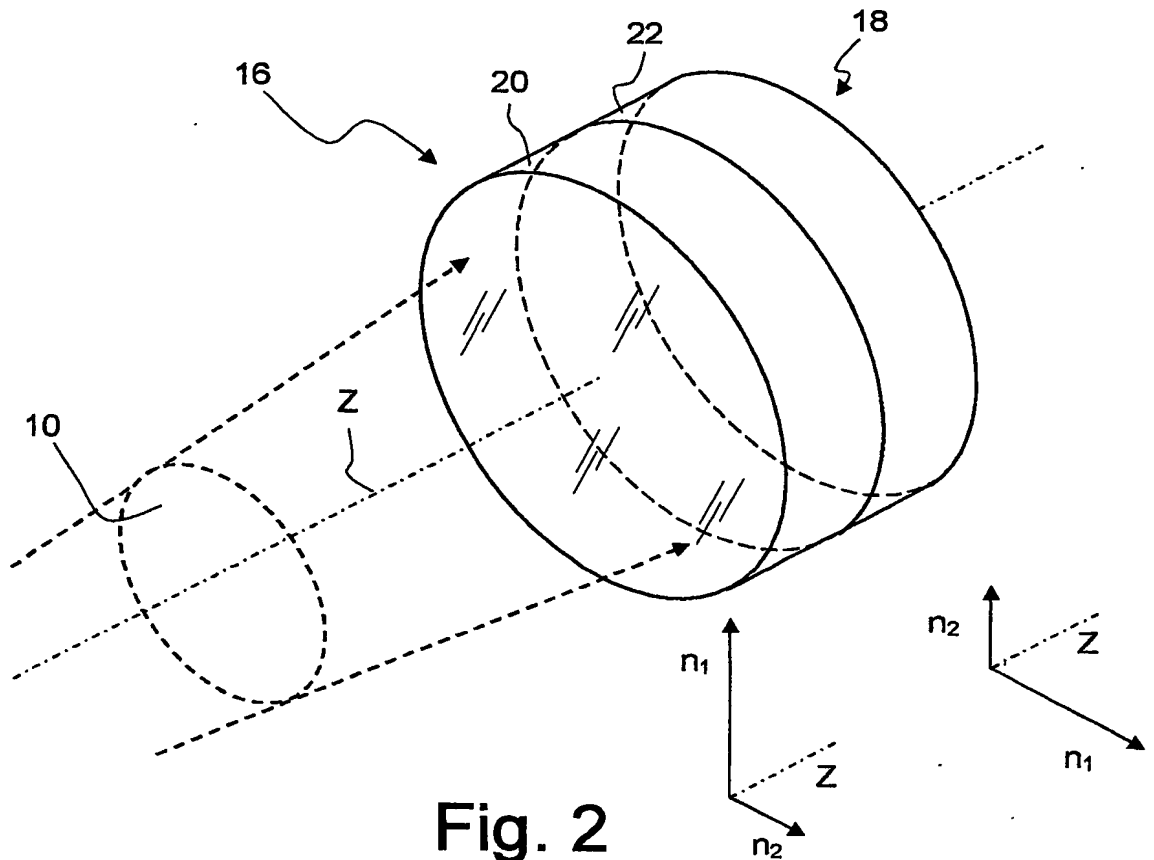


Fig. 2

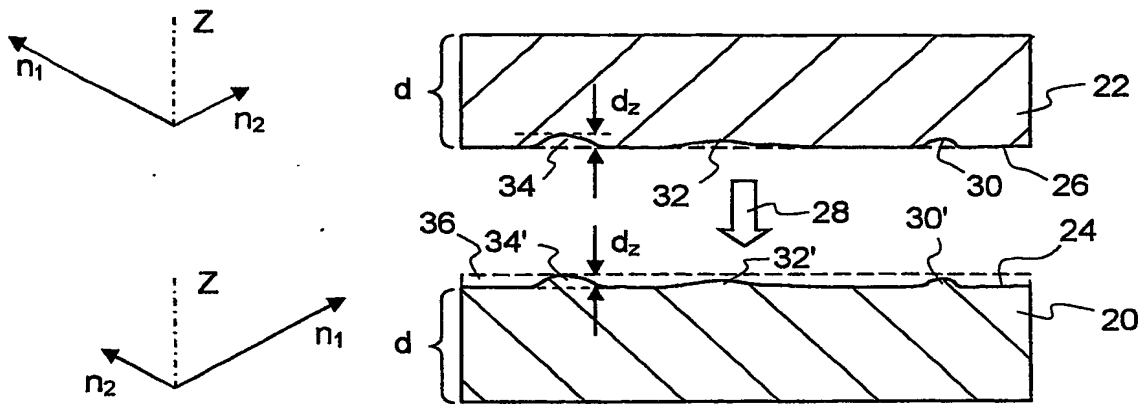


Fig. 3

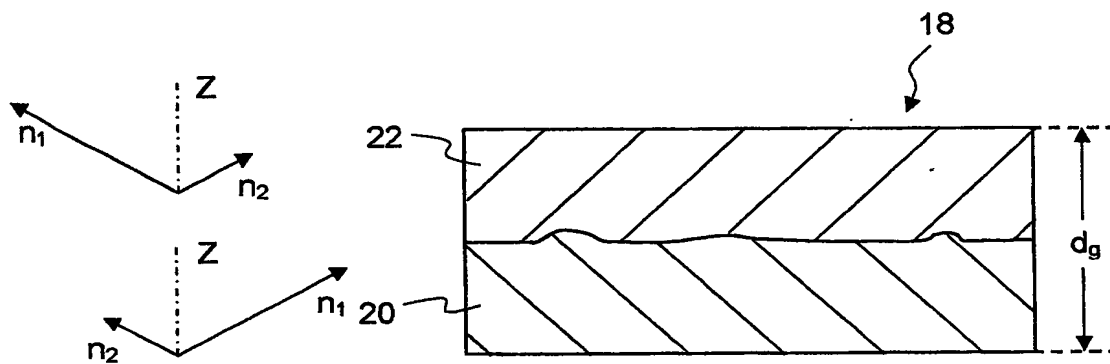


Fig. 4

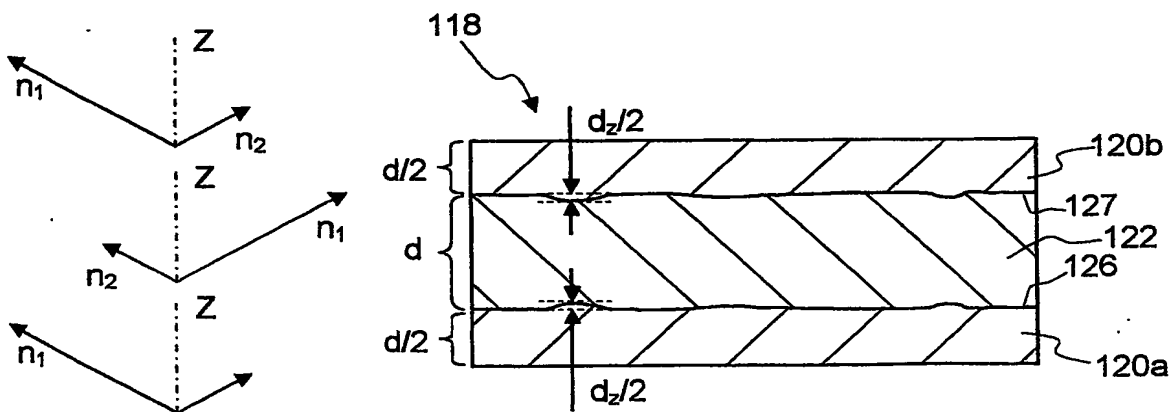


Fig. 5

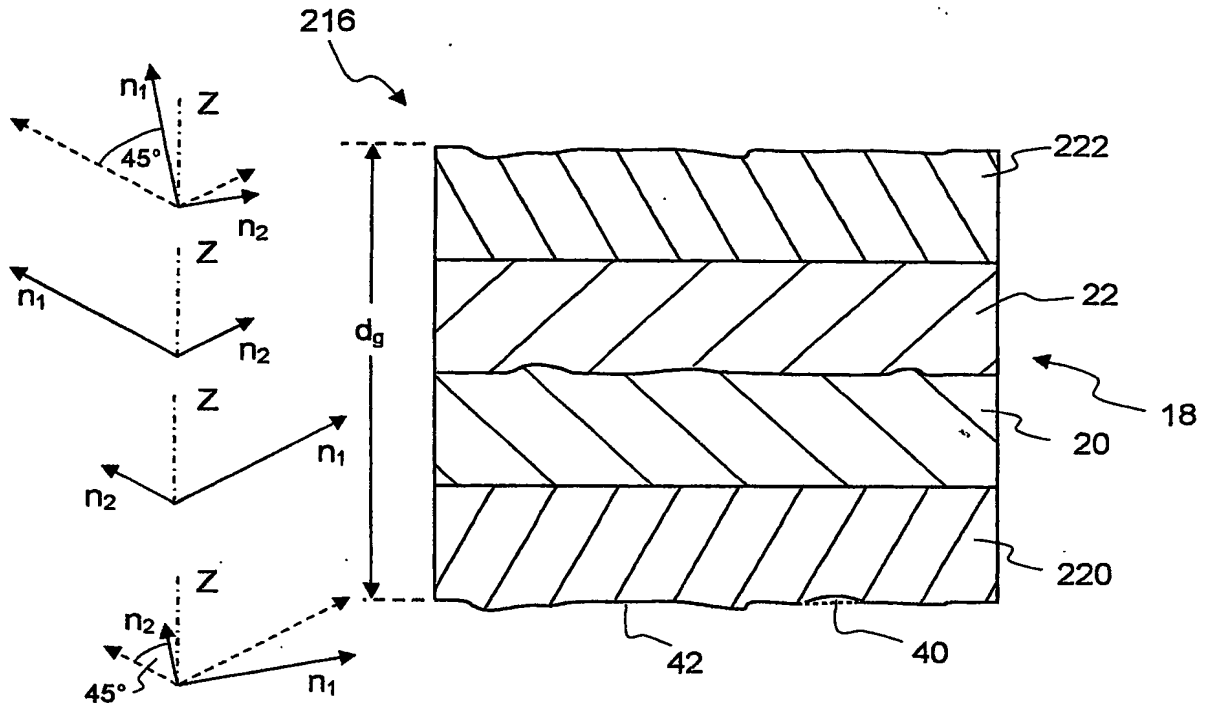


Fig. 6

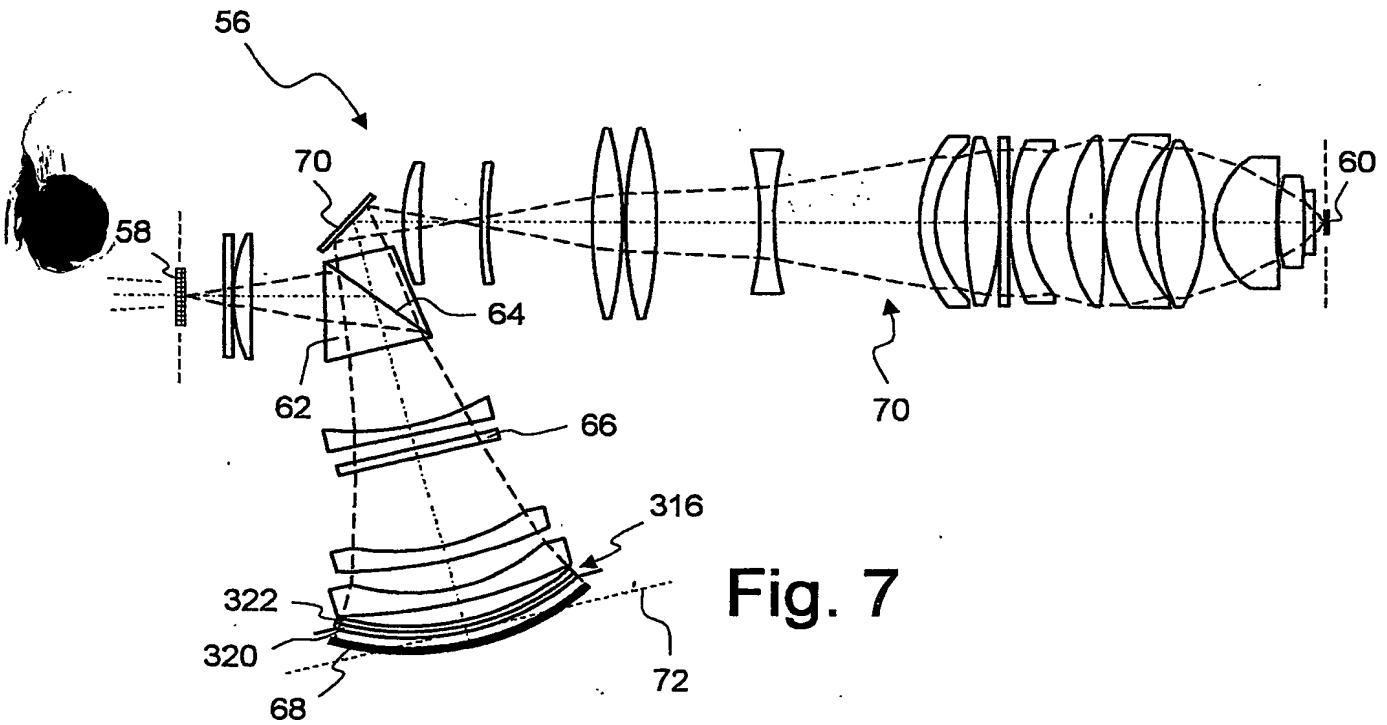


Fig. 7